



## Les forêts, leurs produits et services dans un contexte changeant : apports potentiels de la science

*Yves Birot, Chef de Département honoraire des Recherches Forestières de l'INRA,  
Membre de l'Académie d'agriculture de France*

*Xavier Déglise, Professeur émérite, Université de Nancy*

*Jean-Luc Peyron, Directeur du GIP ECOFOR*

*Bernard Thibaut, Directeur de Recherches émérite au CNRS, Montpellier*

*Bernard Roman-Amat, Directeur du Centre de Nancy, AgroParisTech.*

Manuscrit révisé le 08 février 2013 - Publié le 28 octobre 2013

**Résumé :** *La forêt, et les nombreux biens et services, environnementaux, sociaux et économiques, qu'elle génère directement, ou indirectement à travers les filières industrielles dont elle constitue la ressource, se trouve confrontée à de nombreuses questions et enjeux. Elle a des atouts remarquables dans la perspective d'une « bio-économie » ou économie bio-sourcée en termes de bio-matériaux et de bio-énergie, en substitution de matériaux ou d'énergies faisant appel au carbone fossile. Elle héberge une biodiversité remarquable et joue un rôle important dans les grands cycles biogéochimiques (carbone, eau), et à ce titre contribue significativement à limiter les émissions de gaz à effet de serre. C'est aussi un réservoir de nature pour une société de plus en plus urbanisée. Mais les changements globaux, climatiques, économiques et sociétaux (utilisation des terres), font peser nombre d'incertitudes, voire de menaces sur le futur de la forêt.*

*Dans sa première partie, l'article identifie les grandes questions auxquelles sera confronté le secteur forestier et quels sont les domaines porteurs d'avenir. A partir de cette analyse, la deuxième partie traite des principales approches scientifiques à mettre en œuvre pour répondre à ces questions. Le champ très large couvert par le secteur forestier, couvrant des disciplines extrêmement variées allant de la biologie et de l'écologie au génie des procédés a justifié le choix de présenter les voies de recherche les plus spécifiques au secteur forestier et/ou dont le potentiel d'application semble le plus prometteur.*

Appréhender les potentiels de la science et de la technologie à répondre au développement futur du secteur forestier dans sa globalité, nécessite au préalable de cerner les principaux défis et enjeux pour ce secteur, dans la perspective d'un recours accru à la « bio-économie ». La diversité croissante des objectifs assignés aux forêts : économiques, environnementaux et sociaux, conjuguée à des changements majeurs attendus, en particulier climatiques, rend cet exercice difficile. Dans la variété des produits issus des forêts et industries forestières en termes de matériaux, matières premières, énergie, il s'agit de cibler ceux qui sont porteurs d'avenir. Dans la première partie, cet article identifie les grandes questions auxquelles sera confronté le secteur forestier. A partir de cette analyse, la deuxième partie traite des principales approches scientifiques à mettre en œuvre pour résoudre ces questions. Dans cet article, nous avons fait le

choix de ne pas retracer l'historique des avancées scientifiques en foresterie, mais plutôt de nous projeter dans l'avenir. Nous n'avons pas non plus présenté une liste exhaustive des approches scientifiques pouvant être mobilisées, mais avons sélectionné celles qui sont les plus spécifiques au secteur forestier et/ou dont le potentiel d'application semble le plus prometteur. Il en découle que les champs scientifiques et technologiques concernés relèvent de très nombreuses disciplines.

## 1. Quels sont les défis et les enjeux ?

### 1.1. Adapter les forêts aux changements climatiques

Les changements climatiques, déjà à l'œuvre et à venir, vont impacter les écosystèmes forestiers à travers des phénomènes connus : dépérissements, mortalité, déplacement des aires des communautés et espèces, incendies, pathologies émergentes, etc., mais dont l'intensité et la localisation comportent encore de nombreuses incertitudes. La question est de savoir si les processus évolutifs naturels seront suffisants pour faire face à l'évolution continue du climat et aux événements extrêmes, dont la vitesse, la fréquence et l'intensité peuvent être importants. Dans ce contexte, la gestion forestière doit adopter une démarche volontariste visant à favoriser et accélérer les mécanismes naturels de l'adaptation, voire parfois à préparer une modification drastique de la composition des écosystèmes (par exemple migration assistée, substitution d'espèces), afin d'obtenir des écosystèmes plus stables et plus résilients.

On sait aujourd'hui que la sylviculture (*sensu lato*) doit totalement changer les paradigmes sur lesquels elle était fondée, en raison de l'invalidité des hypothèses de base. Des notions telles que le « site index », les « stations », les interactions entre génotype et environnement, la conservation des espèces et des habitats, etc. reposaient sur une certaine invariance du milieu. Il s'agit aujourd'hui d'imaginer une approche nouvelle et plus holistique, fondée sur une compréhension plus profonde des mécanismes et processus en jeu, et intégrant une palette plus large des biens et services fournis par les forêts.

Adapter les écosystèmes à un contexte changeant et incertain doit se faire à travers un processus volontariste à long terme et itératif, impliquant à chaque instant l'assemblage transdisciplinaire des connaissances disponibles et leur mise en œuvre à travers des modalités de gestion. Ces modalités de gestion peuvent être multiples, selon le type d'écosystème considéré, allant de la non-gestion à une gestion intensive. Ces modalités seront elles-mêmes affinées au fur et à mesure que des connaissances nouvelles apparaîtront et que les leçons tirées de leur mise en œuvre initiale seront disponibles. Cette approche, décrite habituellement sous le terme de **gestion adaptative**, est fondée sur trois composantes : l'assemblage des connaissances disponibles sous forme d'outils opérationnels pour la gestion, la recherche-action et la recherche disciplinaire et transdisciplinaire. Cette stratégie implique également d'appréhender de manière **intégrée l'ensemble des fonctions, biens et services associés à ces écosystèmes** et les liens qui existent entre eux (par exemple liens entre couvert végétal, production de bois, protection du sol et bilan hydrique).

Dans un contexte changeant affectant la dynamique des écosystèmes forestiers, il est crucial pour les gestionnaires de se doter de systèmes d'observation de leurs évolutions. Observer

devient un acte de gestion. Le rôle des systèmes d'observations intégrant des dispositifs de mesure, de monitoring, d'observation, à différents niveaux d'échelle et d'intensité, et concernant de nombreux paramètres physiques et biologiques devient majeur, pour ajuster les réponses en termes de gestion (Figure 1). Une mise en réseau et un partage des données transfrontalier sont nécessaires pour accroître la cohérence de l'ensemble. A cet égard, il convient de souligner à l'attention des décideurs, le caractère essentiel du financement de ces systèmes d'observation sur le moyen et long terme.



**Figure 1 - Tour à flux en forêt de Hesse (Moselle).** Le dispositif de Hesse fait partie du réseau national SOERE (Systèmes d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche en Environnement), et du sous-réseau *F-ORE-T* (Fonctionnement des écosystèmes forestiers). Il mesure en continu les flux de CO<sub>2</sub> et d'H<sub>2</sub>O au dessus d'une hêtraie de plaine, pour évaluer et modéliser les bilans de carbone et d'eau (photo INRA).

## 1.2. Produire durablement, mobiliser et utiliser la biomasse<sup>1</sup> à des fins multiples

La forêt et ses filières pourraient occuper une place majeure dans la perspective d'une « bio-économie » fondée sur l'utilisation de matières premières, matériaux, fibres et composés chimiques, et de sources d'énergie, largement renouvelables et à faible empreinte carbone. Il semble possible : i) d'accroître l'emploi de la biomasse ligno-cellulosique en augmentant la récolte pour certaines espèces et dans certaines régions ; ii) de développer la production de bois d'oeuvre en quantité et de qualité homogène ; iii) d'économiser la matière première dans les process industriels ; iv) de développer la part du recyclage, notamment en fin de vie. La question de plantations allant de systèmes intensifs dédiés (Futaie à courte révolution -FCR-, taillis, TCR - taillis à courte rotation -, TTCR - taillis à très courte rotation ; à base de pins, peupliers, eucalyptus, etc.) à la production d'une ressource sur mesure, sur des terrains actuellement forestiers et agricoles ou des friches, retrouve de la pertinence.

<sup>1</sup> Biomasse est pris ici dans son sens le plus large : donc bois d'oeuvre, bois d'industrie, etc.

La dynamisation de cette approche « bio-économique » suppose des réponses à des questions actuelles :

**a) en termes économiques**

- comment le secteur industriel en aval peut-il constituer un débouché pour cette biomasse ? Pourquoi n'a-t-on pas dans le secteur Bois des entreprises (nationales ?) équivalentes aux grandes entreprises de l'agroalimentaire ? Le bois n'est toujours pas un produit industriel et est encore toujours le sous-produit de la Forêt !

- comment lever les freins à la mobilisation de la biomasse ? En particulier, la fragmentation du foncier forestier privé peut-elle être atténuée et comment ?

- comment garder compétitive la biomasse produite (notamment avec celle produite massivement dans l'hémisphère sud) ? Par tous les moyens, il convient de réduire les coûts de gestion et de production, pour rester compétitifs,

- comment éviter la concurrence entre filières (bio-énergie vs. panneaux ou pâte à papier) ?

**b) en termes technologiques, il s'agit de :**

- dynamiser la sylviculture dans les peuplements actuels.

- améliorer l'évaluation quantitative et qualitative de la ressource ligneuse et son évolution dans le temps pour permettre une stratégie industrielle sur le long terme.

- mettre en place les connaissances (bases de données) et les outils (traçabilité, stockage et commercialisation) visant à promouvoir un usage extensif de l'ensemble de la diversité des espèces présentes dans les forêts françaises.

- accroître les efforts en matière d'amélioration génétique et de création variétale : pour une ressource « sur mesure ».

- développer la démarche de valorisation dite en cascade, visant à maximiser valeur ajoutée, emplois, économie de carbone fossile et stockage de carbone à travers la succession : matériau, panneaux et pâte à papier, bioraffinerie, énergie.

- développer de façon raisonnée le bois-énergie, la « bioraffinerie » et la chimie verte

- améliorer les process de première transformation ; considérer le bois comme un matériau industriel pour accroître les performances des produits à base de bois.

**c) en termes écologiques, les questions sont relatives à**

- l'impact du raccourcissement des rotations ou de l'intensification sur la fourniture d'autres biens et services fournis par les écosystèmes forestiers, notamment les services écosystémiques : fertilité du sol, stockage en forêt du carbone, biodiversité, protection des sols, ressources en eau.

- le bilan du carbone mérite une attention spéciale : on demande aux forêts d'en conserver (stockage pérenne) et d'en absorber le plus possible; ce carbone doit repartir le plus tard possible dans l'atmosphère (rejets par filière) ; le sujet est de plus en plus aigu, et complexe.

- l'analyse du cycle de vie des « applications » bois comme outil d'aide au choix des biens et

services à valoriser (de l'aspect non marchand aux produits commercialisables, par exemple des molécules bio-actives !).

- un développement d'une « agroforesterie » combinant récolte forestière et agriculture « biologique ».

#### **d) en termes de politiques**

- la biomasse ligneuse sera produite dans des systèmes variés allant du très extensif au très intensif dans un cadre global de durabilité, mais avec un poids relatif variable attribué aux 3 composantes : sociale, économique, environnementale. Ceci plaide pour une certaine forme de spécialisation, pouvant être spatialement explicite. On remarquera en passant que la multifonctionnalité a d'autant plus de chance d'être effective, qu'elle est organisée spatialement (trame verte ou corridors de mobilité des espèces, réseau de coupures de combustible<sup>2</sup>, etc.).

- les filières de bio-raffinerie et de chimie verte peuvent être fondées sur une utilisation complémentaire des bio-ressources d'origine agricole et forestière. Cela implique une intégration des politiques concernant ces secteurs à l'échelle des territoires.

### **1.3. Diversifier et valoriser les biens et services issus des forêts**

Les forêts contribuent de façon significative au bien-être des sociétés en leur apportant des biens et services très demandés. L'importance relative des biens et services forestiers non marchands (essentiellement biens publics et externalités liées à la protection et gestion active des ressources forestières) est particulièrement marquée dans certains types de forêt ou d'écosystèmes. La nature économique de ces types de biens et services (caractérisés souvent par un manque de débouchés) cause d'importants dysfonctionnements du marché qui empêchent les producteurs (les propriétaires forestiers qui supportent les coûts de la gestion forestière) d'internaliser leur valeur intégrale. En conséquence, certains propriétaires ne sont pas incités à aménager leurs forêts de façon à garantir la fourniture durable et socialement optimale des biens et services non marchands. De surcroît, la motivation, les préférences et les objectifs des propriétaires forestiers ont également évolué au cours des dernières décennies, ce qui a eu des répercussions sur les bénéfices qu'ils ont tirés des différents biens et services forestiers. Accroître la rentabilité et mettre en œuvre des instruments économiques innovants pour incorporer les biens et services non marchands sont des éléments clés de la gestion forestière durable.

La baisse des prix des produits forestiers ligneux, les coûts de mobilisation élevés et les difficultés d'accès à ces ressources nuisent à la rentabilité de la gestion forestière. Cette situation, conjointement au fait que les propriétaires forestiers ne tirent pas de revenus des biens et services non marchands très demandés, et aux changements sociologiques de la motivation des propriétaires, porte souvent à l'abandon de la foresterie. Dans ce contexte, la création de nouveaux débouchés et produits pour incorporer les services non marchands, l'exploitation des ressources forestières pour la biomasse comme source d'énergie renouvelable, ainsi qu'une meilleure mobilisation de ces ressources (y compris les produits non

---

<sup>2</sup> *improprement qualifiés de pare-feux*

ligneux) peuvent jouer un rôle important pour accroître la rentabilité de la foresterie.

Les principaux défis peuvent se résumer comme suit :

- Évaluer en termes monétaires les biens et services offerts par les forêts.
- Stimuler la fourniture de biens et services forestiers non marchands importants (dont le financement de la conservation de la biodiversité et des aires protégées) en introduisant de nouvelles politiques et instruments économiques.
- Analyser et améliorer la rentabilité de la foresterie, par exemple : ouverture de nouveaux débouchés, produits et utilisations, comme l'extraction de la biomasse).
- Comprendre les motivations et perceptions des propriétaires forestiers et de la société à l'égard des forêts et de la foresterie.
- Mettre au point de nouveaux modes de gouvernance et réformes institutionnelles, et intégrer les politiques forestières dans le cadre de politiques de développement rural plus vastes.

Malgré la multifonctionnalité marquée des forêts dans la fourniture de biens et services de valeur, les approches traditionnelles de sylviculture et d'aménagement ont été jusqu'à présent basées sur le bois, et le sont toujours dans les pratiques de gestion. Toutefois, il est rare que le bois soit le seul objectif, ou même le plus important. Aujourd'hui, la gestion de la forêt doit assurer la production de biens économiques traditionnels et de services à fonction sociale (loisirs, beauté des paysages, etc.), tout en sauvegardant leurs fonctions de protection (sols, bassins versants) et leurs fonctions environnementales (biodiversité, amélioration du climat, séquestration du carbone) dans un cadre intégré d'aménagement du territoire. De surcroît, les risques croissants (par exemple : feux de forêt, sécheresses, bio-agresseurs) et les incertitudes régnant sur les décisions concernant la foresterie et dues aux changements du climat et de l'occupation des sols (voir sections précédentes) doivent être expressément pris en compte dans le processus décisionnel de gestion forestière.

Enfin, les forêts font généralement partie de paysages ruraux hétérogènes et en mosaïque qui doivent être planifiés de manière intégrée, car de nombreux objectifs de gestion forestière ne peuvent être évalués au niveau du peuplement ni même à celui de la forêt. Par exemple, un aménagement écologiquement rationnel, la prévention des incendies, la gestion des bassins versants ou l'amélioration des fonctions récréatives requièrent la prise en compte de zones à plus vaste échelle que celle de la forêt considérée, ce qui implique une approche intégrée et globale au niveau des paysages. Propriétaires et gestionnaires forestiers ont ainsi besoin d'outils d'aide à la décision adaptés et basés sur des données scientifiques pour la gestion des forêts, afin d'optimiser la production conjointe de multiples biens et services (production d'eau, produits non ligneux, etc.) à différentes échelles temporelles et spatiales dans un contexte de risques croissants.

De ces considérations découlent quelques défis :

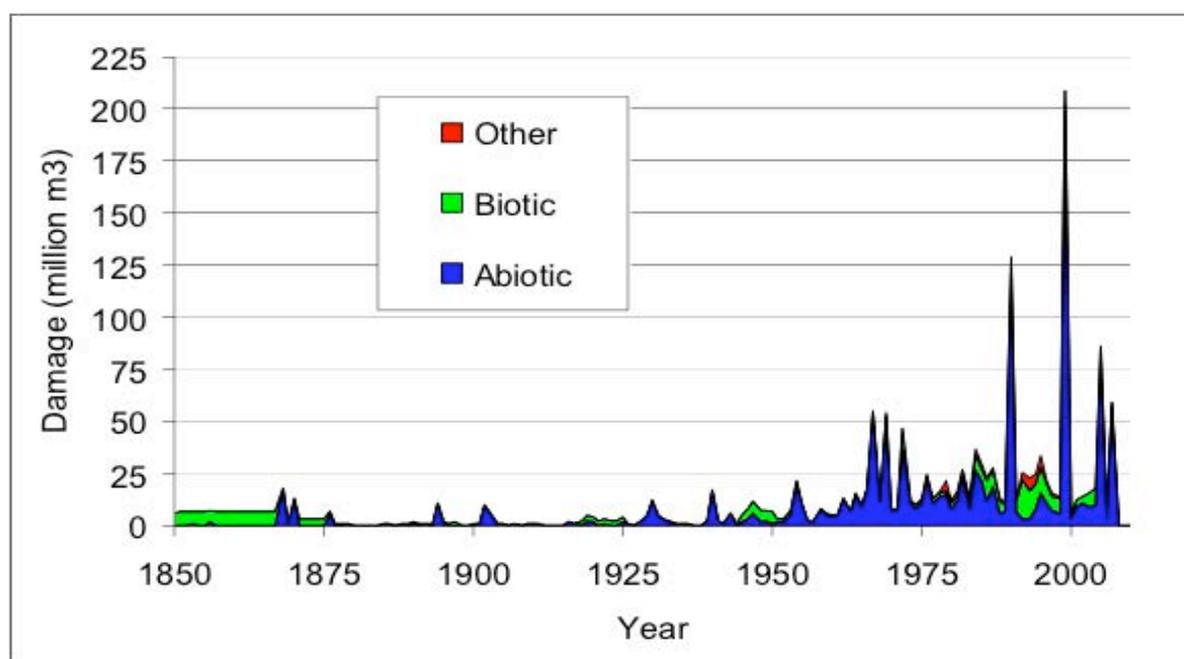
- Mettre au point des outils de prévision des effets de la gestion forestière sur les multiples biens et services forestiers, et les ressources connexes : eau et sols.

- Mettre au point une sylviculture adaptative axée sur des objectifs afin de garantir la fourniture de biens et services utiles dans un environnement en pleine évolution.
- Concevoir de nouveaux modèles d'aménagement forestier adaptés à la multifonctionnalité des forêts à une échelle intégrée du peuplement forestier au paysage.
- Élaborer des systèmes conviviaux d'aide à la décision pour les paysages forestiers afin de comprendre les préférences des principales parties prenantes concernant les biens et services forestiers, et être en mesure d'optimiser la gestion forestière pour garantir la fourniture de ces biens et services.

#### 1.4. Vivre avec les risques

Les risques biotiques et abiotiques, liés ou non aux changements climatiques, sont responsables de dommages économiques et environnementaux dont le niveau s'est accru au cours des dernières décennies (Figure 2). Plus de la moitié des dommages observés, en termes de pertes de bois, est due à l'effet direct des tempêtes. Dans certains cas, l'exposition aux risques connaîtra une extension spatiale importante (incendies, ravageurs, dépérissements liés à la sécheresse). Parmi les risques biotiques, la pression des ongulés constitue une composante majeure, tandis que les pathologies émergentes (par exemple le nématode du pin) et le développement d'espèces invasives, souvent liés aux échanges transcontinentaux, représentent des menaces croissantes. L'impact des aléas biotiques ou abiotiques ne doit pas seulement s'évaluer en perte économique de bois, mais sur l'ensemble des biens et services fournis par les écosystèmes forestiers.

Les risques ne peuvent être éradiqués. La seule stratégie possible est d'en limiter les effets à des seuils socialement, économiquement et « environnementalement » acceptables. On voit alors que la valeur de l'acceptabilité de ces seuils peut varier dans le temps et dans l'espace et



**Figure 2 - Dégâts aux forêts européennes : un accroissement préoccupant**

Période 1950-2000, volume annuel moyen des dégâts : 35 millions de m<sup>3</sup>

Causes : Tempêtes : 53 % - Incendies : 16 % - Bio-agresseurs : 16%

(D'après Schelhaas, 2008, *Dissertationes Forestales* 56, Alterra Scientific Contributions 23.)

selon les acteurs concernés. Intégrer les risques dans la gestion forestière implique à la fois :

- d'évaluer et de mesurer les aléas, leur occurrence et leur mode d'action.
- de quantifier le degré d'exposition des zones forestières concernées à différents niveaux d'échelle.
- de connaître leur vulnérabilité en fonction d'enjeux divers.
- d'en tirer des règles de gestion visant à la réduction du risque et la constitution d'écosystèmes plus résilients à la fois écologiquement et économiquement.
- de partager le risque. En matière forestière toutefois, le partage du risque par l'assurance rencontre de sérieuses difficultés de faisabilité ; la solution est à rechercher du côté d'un partenariat public/privé.
- de maîtriser les éléments techniques liés à la reconstitution forestière là où elle est justifiée.
- d'intégrer économiquement plusieurs risques dans l'aménagement forestier.

Les approches scientifiques mise en œuvre varient grandement selon les risques concernés, et font appel à des disciplines spécifiques. Toutefois, un défi particulier est d'intégrer dans la gestion forestière plusieurs risques, ce qui est en pratique une situation fréquemment rencontrée.

Vivre avec les risques abiotiques et biotiques, peut être un objectif d'autant plus atteignable, que les écosystèmes forestiers sont **résilients à la fois écologiquement et économiquement** ; c'est à dire qu'ils soient capables de revenir à l'état initial après l'occurrence d'un aléa. A cet égard, une attention plus grande devrait être portée aux peuplements irréguliers et/ou mélangés (pluri-spécifiques) dont l'avantage comparatif est établi dans certaines situations, vis-à-vis de certains insectes ravageurs ou dans le cas de tempêtes.

Le domaine des risques est un de ceux pour lesquels la question de l'expertise scientifique collective se pose avec le plus d'acuité. Dans ce domaine encore, la coopération transfrontalière revêt une importance particulière.

### 1.5. Anticiper et éclairer

Le long terme des spéculations forestières rend impossible des corrections de trajectoires fréquentes ou rapides. Dans le secteur forestier plus qu'ailleurs, l'anticipation comme la nécessité « d'éclairer la route plus loin que la portée des phares » ont une très grande importance.

*« Dans un contexte général de globalisation et d'incertitudes croissantes, il est important de se doter de capacités d'anticipation aussi bien vis-à-vis des dynamiques scientifiques et technologiques que des évolutions de la société. Cette anticipation doit permettre une meilleure définition des orientations scientifiques à moyen et long terme, de les articuler avec celles des autres organismes au sein de coopérations nationales et d'initiatives européennes et internationales.*

*Parallèlement, la science est de plus en plus appelée à proposer des analyses synthétiques pour la société - pouvoirs publics, acteurs économiques, collectivités, associations. L'horizon des activités s'élargit aussi, avec l'émergence de demandes locales (collectivités territoriales)*

et le besoin croissant d'éclairage à des échelles européennes voire globales (expertises internationales).

*L'objectif est donc de répondre à ces besoins (i) en élaborant, à l'occasion des expertises scientifiques collectives explicitement demandées par les pouvoirs publics, des synthèses et des « états de l'art » sur des sujets complexes, (ii) en concevant et conduisant des prospectives scientifiques et « sociétales » qui permettent, par la mise en perspective et la construction de scénarios, d'anticiper différentes évolutions scientifiques et technologiques possibles, de nouveaux questionnements ou de nouveaux défis sur lesquels pourraient buter les sociétés, (iii) en réalisant des études qui mobilisent des compétences scientifiques et utilisent des modèles et des données de différentes natures pour des simulations utiles à la société et à la réflexion scientifique.» (INRA Une Science pour l'impact - Document d'orientation 2010 - 2020). »*

Il convient enfin de remarquer que les écosystèmes forestiers et leur gestion, devraient être raisonnés dans le contexte plus large de la gestion des territoires. Il faudrait intégrer les espaces forestiers dans une gestion multi-objectif et multi-échelle des territoires ruraux et urbains et de leurs ressources (sol, eau, biodiversité). La sectorisation des acteurs et des institutions fait que cette démarche, certes complexe, mais aussi pertinente en termes de politiques et stratégies territoriales, est rarement mise en œuvre.

## **2. Qu'est-ce qui peut être utile au secteur forestier dans les progrès scientifiques et technologiques attendus ?**

### **2.1. Génomique des arbres forestiers (réf. 1)**

La recherche en génomique des arbres vise à :

#### *a) Comprendre la structure des génomes des arbres*

Une compréhension détaillée de la structure du génome dans un cadre évolutif et comparatif sera possible par un séquençage du génome complet, actuellement entrepris mais pour un petit nombre d'espèces, grâce au développement rapide des technologies de séquençage de nouvelle génération et à la génomique comparative.

#### *b) Comprendre les relations phénotype-génotype*

Il s'agit de comprendre la fonction des gènes et comment chacun est lié aux phénotypes, en mettant l'accent sur les gènes qui déterminent un mode de développement d'espèce longévive, pérenne et ligneuse.

#### *c) Évaluer et suivre la diversité génétique adaptative*

Il s'agit de mesurer et de caractériser la diversité génétique dans les populations domestiquées et naturelles d'espèces forestières et de déterminer comment cette diversité est liée à l'énorme diversité phénotypique que l'on trouve chez ces espèces. Les généticiens forestiers se sont penchés depuis longtemps sur ce domaine de recherche, mais aujourd'hui, avec les « scans » du génome entier, le géo-référencement de vastes échantillons de populations, et de riches systèmes d'information géographique (SIG) et base de données écologiques, ce domaine de recherche va se développer rapidement. Une telle information est indispensable pour gérer les populations d'arbres forestiers soumises aux changements climatiques. A la frontière de la génétique, de la génomique, de l'écologie et de l'évolution, la

génomique des populations émerge comme un champ scientifique prometteur (voir encadré 1).

#### d) Développer les outils de la génomique

Les outils de la génomique sont nécessaires pour fonder l'amélioration génétique des

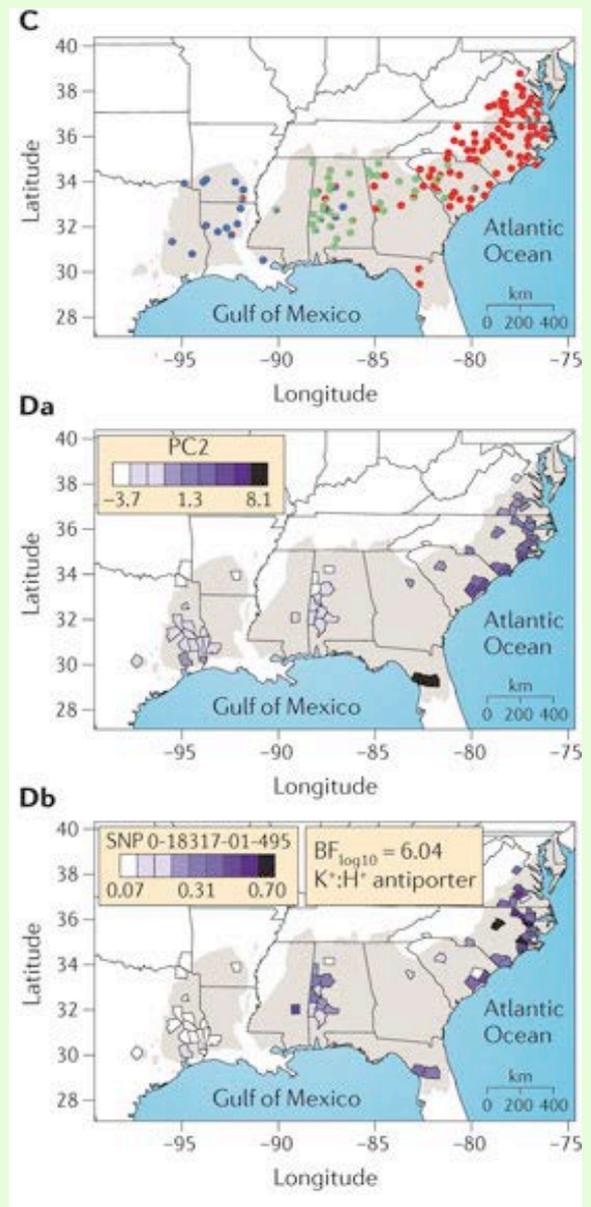
### Encadré 1. Génomique des arbres forestiers à l'échelle du paysage et adaptation

« Une approche émergente a été de conduire des études de génétique d'association dans un contexte écologique et évolutif bien défini, dans lequel les phénotypes et composantes environnementales sont disséquées pour permettre une analyse corrélative entre phénotypes et génotypes à une échelle fine. Un exemple illustrant cette approche est fourni par l'étude des variations clinales (= continues) chez les arbres forestiers. La plupart des arbres forestiers révèlent des variations continues pour des caractères phénologiques le long de gradients écologiques, et des recherches ont tenté de conduire simultanément un test d'association et la détection d'une signature clinale au niveau génomique. Un autre exemple de cette approche est l'étude des « patrons » géographiques de variabilité génétique adaptative chez *Pinus taeda* dans le sud-est des Etats-Unis (voir fig. ci-dessous). Des bases de données très complètes de la variabilité génétique adaptative dans les populations d'arbres forestiers et des données écologiques correspondantes sont nécessaires, de sorte que les informations peuvent être combinée avec les modèles climatiques, pour évaluer l'aptitude d'une espèce à répondre ou par migration, ou par adaptation, aux changements environnementaux prédits. Ce type d'application va, dans un futur proche, faire l'objet d'une grande priorité dans les recherches en génomique des arbres forestiers. Source : Neale and Kremer, 2011-réf. 1.

#### Légende de la figure.

**C.** Modes de distribution neutres de la structure des populations de *P. taeda* résultant d'une analyse en composantes principales sur environ 4.000 SNPs. Les couleurs représentent la proportion des arbres en chaque lieu assignée à un des trois groupes génétiques.

**D.** Modes de distributions adaptatifs de la diversité génétique de *P. taeda* résultant de la prise en compte d'un seul SNP. La **fig. Da** représente la distribution spatiale d'un gradient pluviométrique. La **fig. Db** représente la fréquence de l'allèle mineur. La corrélation entre les deux est hautement significative.



populations de production (par exemple, variétés intégrant un nombre plus grand de caractères notamment en matière d'adaptation au milieu physique et de résistance aux bio-agresseurs) et la bonne gestion des populations proches de l'état naturel (par exemple, outils de diagnostic de la diversité génétique des peuplements forestiers, contribution à un indice de vulnérabilité et décisions de régénération naturelle). La demande sociale pour les produits forestiers (bois massif, papier, énergie) est importante, et les stratégies de sélection basées sur la génomique

peuvent grandement améliorer les approches seulement basées sur le phénotype. Ces outils peuvent aussi conduire à des marqueurs efficaces pour la prédiction de la diversité des propriétés des produits ligneux dans leur ensemble, ainsi que de leur traçabilité. Les techniques performantes de transformation génétique restent à développer pour la plupart des espèces forestières.

Pour atteindre ces objectifs, il convient de mettre en œuvre les approches scientifiques suivantes :

a) acquérir les séquences de référence du génome pour de nombreux genres et espèces (en particulier dans le monde tropical).

b) utiliser les approches de la génomique pour analyser les fonctions écologiques.

c) évaluer la différenciation adaptative et les divergences d'espèces dans les populations naturelles grâce au séquençage de nouvelle génération.

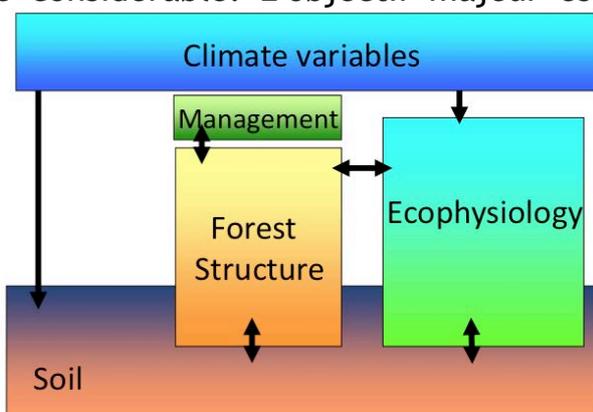
d) construire des bases de données géo-référencées de la diversité génétique qui permettront à long terme de comprendre les principaux déterminants écologiques de la diversité génomique et phénotypique dans les écosystèmes naturels.

d) développer des technologies améliorées de phénotypage ; à cet égard, les généticiens devront développer en étroite collaboration avec les physiologistes, les écologistes et les ingénieurs, des technologies de séquençage à haut débit, à la fois informatives, précises et standardisées.

*NB. Des obstacles réglementaires forts compromettent actuellement l'utilisation des OGM en forêt ; elle est rejetée en bloc par les deux processus internationaux de certification de gestion forestière (FSC et PEFC). Au plan scientifique toutefois, la transgénèse garde toutefois toute sa place (voir les articles d'Yves Chupeau). Une action européenne COST en cours vise à faire le point sur la biosécurité des arbres forestiers génétiquement modifiés pour éclairer l'opinion publique et préparer de futures directives européennes.*

## 2.2. Approches prédictives en biologie et écologie forestières

Il s'agit là d'un vaste champ scientifique trans-disciplinaire dont l'apport au domaine forestier peut être considérable. L'objectif majeur est d'intégrer des connaissances sur les processus



**Figure 3 - Schéma simplifié du modèle fonctionnel GOTILWA +** (Source : Gracia 2010 -[www.creaf.uab.es/](http://www.creaf.uab.es/)). Ce modèle prend en compte les interactions entre de nombreux compartiments dont la sylviculture qui agit sur la structure du peuplement. Il ouvre la porte à de nombreuses applications.

biologiques et physiques au sein des arbres et des écosystèmes, se situant à différents niveaux d'échelle spatiale et temporelle, dans des modèles numériques de simulation (Figure 3).

« Les approches prédictives en biologie se situent au carrefour de la biologie intégrative et de la modélisation. La première fait le lien entre des recherches sur la molécule et celles sur les

*populations. La deuxième permet de modéliser des phénomènes complexes et a pris son essor, suite au progrès des techniques d'analyse à haut débit qui apportent des quantités de données sur les gènes et leur expression en fonction de l'environnement. Grâce à ces nouvelles approches et aux modèles qu'elles peuvent fournir, on pourra explorer des réponses dans des conditions environnementales variables et apporter des prédictions sur des sujets aussi divers que le pilotage des écosystèmes, le contrôle des épidémies ou le suivi de la distribution spatiale d'espèces animales et végétales.» (INRA Une Science pour l'impact - Document d'orientation 2010 - 2020).*

En écologie forestière, les perspectives de progrès scientifiques et d'applications à la gestion semblent très prometteuses. On en trouvera ci-dessous quelques exemples :

#### **a) rôle fonctionnel de la biodiversité et changement climatique (réf 4)**

Il s'agit de comprendre les processus écologiques qui façonnent la composition en espèces et qui sont particulièrement sensibles aux conditions du climat. La composition en espèces forestières est déterminée par le groupement des espèces arborées avec, à la fois, les espèces mutualistes (symbiotes) et antagonistes (herbivores, pathogènes) qui pilotent la composition en espèces arborées. Il faut aussi élucider les relations entre biodiversité forestière et productivité de la forêt en améliorant la compréhension des rôles respectifs de la richesse et de la composition en espèces arborée, et en mettant l'accent sur les interactions biotiques entre espèces. Les flux d'énergie à travers les différents niveaux trophiques sont analysés puisque l'hypothèse fondamentale en écologie qui sous-tend la relation diversité-productivité est l'utilisation optimale des ressources. On peut ensuite agréger l'information pour prédire l'effet du changement climatique sur la productivité forestière à travers la composition en espèces arborées. Cette prédiction peut être exprimée en termes de risque de perte de productivité de la forêt, considérée comme une fonction de la probabilité de scénarios de changement climatique, de la sensibilité de la forêt au changement climatique en fonction de sa composition, et de la productivité en biomasse forestière en fonction de sa composition.

#### **b) Écologie du mouvement (réf. 2)**

Le mouvement des organismes individuels, l'une des plus importantes caractéristiques de la vie sur terre, est une composante essentielle de n'importe quel processus écologique et évolutif, y compris des problèmes majeurs liés à la fragmentation des habitats, les changements climatiques, les invasions biologiques et la dispersion des bio-agresseurs. Le concept d'écologie du mouvement se réfère à un paradigme scientifique qui place le mouvement lui-même comme thème focal de la recherche. En fournissant un cadre scientifique unifié et des outils communs, il vise à promouvoir le développement d'une théorie intégrative du mouvement des organismes, pour mieux comprendre les causes, les mécanismes, les types et les conséquences de tous les phénomènes de mouvement. L'écologie du mouvement offre une perspective pour lier les processus aux arrangements observés (« patterns ») écologiques, et pour préciser le rôle du mouvement dans le déterminisme des processus écologiques et évolutifs. On reconnaît de plus en plus la nécessité de comprendre les processus du mouvement pilotant les invasions biologiques, la dispersion des bio-agresseurs, et la persistance de populations locales ou d'espèces entières à la lumière des changements environnementaux en cours. Associée à des améliorations majeures de notre aptitude à enregistrer et analyser le

mouvement, l'écologie du mouvement a le potentiel d'ouvrir la voie au développement d'une théorie unifiée du mouvement des organismes (végétaux et animaux). Elle peut nous aider à résoudre nos problèmes écologiques les plus urgents, et au-delà, à répondre à des questions telles que les mouvements collectifs de groupe, la connectivité à grande échelle et les mouvements des micro-organismes.

**c) Approches de modélisation intégrative, dynamique et mécanistes (« process-based ») des écosystèmes forestiers**

Ces approches combinent des processus bio-physiques, génétiques et de dynamique de peuplement. Elles permettront de prendre en compte des aspects fondamentaux, mais actuellement négligés du contexte du changement global : par exemple prendre en compte : i) dans la partie biophysique : la réponse aux fluctuations climatiques ; ii) dans la partie génétique : le potentiel évolutif ; iii) dans la partie dynamique du peuplement : les interactions biotiques. (Voir Encadré 2).

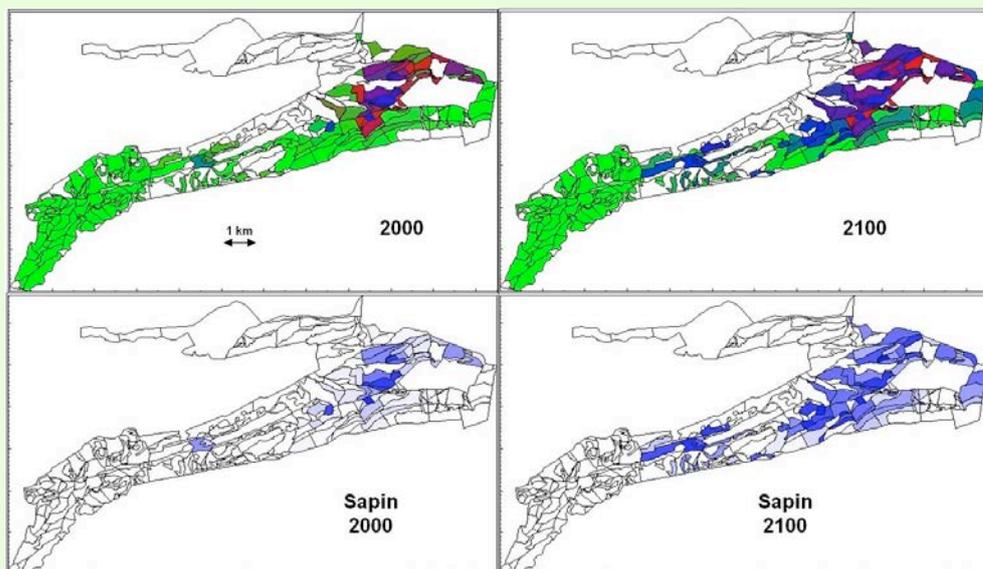
**d) Évaluation quantitative de l'impact de mesures adaptatives sur la trajectoire des services écosystémiques**

**Encadré 2. Couplage de modèles de flux de gènes et de dynamique forestière**

La gestion forestière vise des objectifs multiples : fonctions économiques, écologiques, sociales, gestion et conservation de la biodiversité et des ressources génétiques ... Les chercheurs de l'INRA et du CIRAD sont parvenus à coupler des modèles de flux de gènes et de dynamique forestière. Après intégration dans l'outil informatique CAPSIS, des simulations ont été réalisées sur un vaste panel de situations forestières et d'espèces. Elles révèlent le comportement de communautés d'espèces et de populations d'arbres et suggèrent des stratégies et des indicateurs pour la gestion et la conservation des écosystèmes forestiers.

**Le module VentouG** a été élaboré à l'INRA d'Avignon, unité de recherche « Écologie des forêts méditerranéennes » (Ph. Dreyfus, C. Pichot).

Les cartes ci-après illustrent le résultat de la simulation de 2000 (à gauche) à 2100 (à droite), de la colonisation naturelle du Sapin (en bleu) et du Hêtre (en rouge) dans les peuplements de Pins (sylvestre, ou à crochets, en vert) en versant nord du Mont-Ventoux, entre 900 et 1600 m d'altitude. L'interaction avec la gestion sylvicole peut également être simulée. Le modèle prend en compte la dispersion des graines à longue distance, la régénération, la compétition intra et inter-spécifique, la croissance et la mortalité. Sur les cartes du bas, la teinte est d'autant plus foncée que la proportion de Sapin est forte.



Le Sapin s'étend fortement à partir d'un noyau de sapinières matures ; déjà observée en 2000 (unités en bleu plus ou moins clair autour du noyau), cette évolution s'amplifie fortement, d'après la simulation, de 2000 à 2100. La partie gauche de la carte, plus éloignée des sapinières-sources et correspondant à des altitudes basses moins favorables au Sapin (et au Hêtre), notamment dans le contexte du réchauffement climatique, n'est pas colonisée.

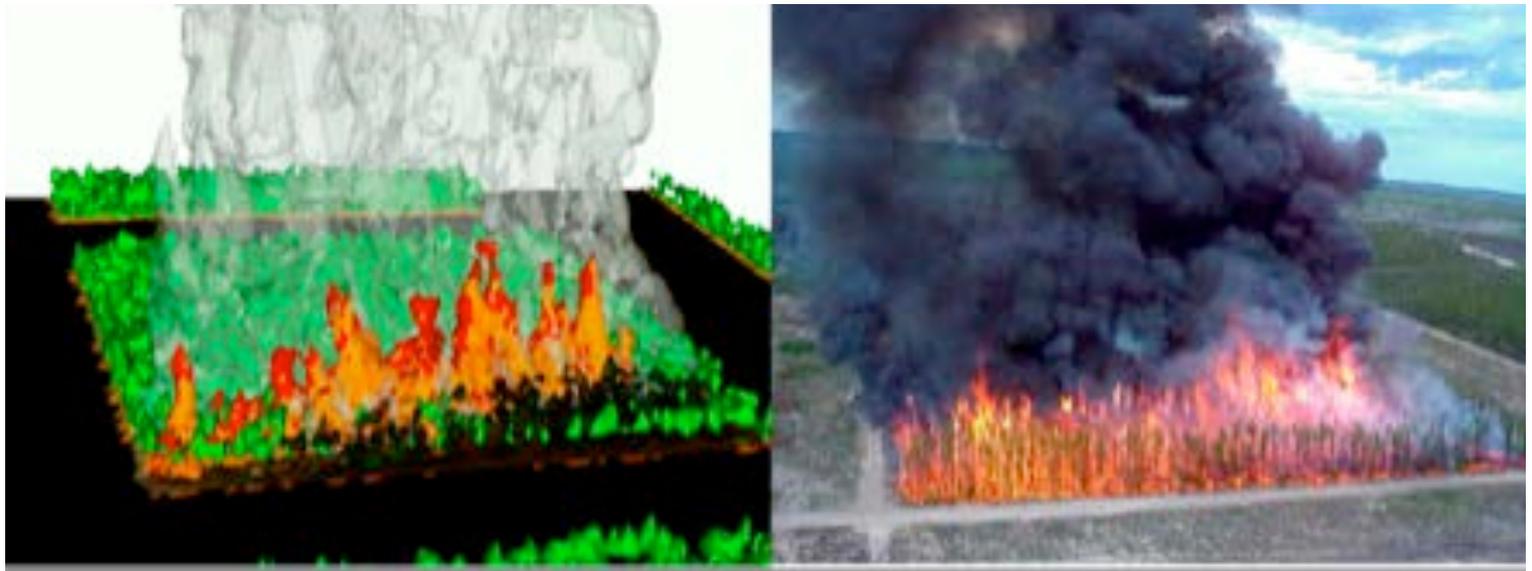
source : [http://www.inra.fr/presse/evolution\\_demogenetique\\_en\\_foret\\_modeles\\_et\\_simulation](http://www.inra.fr/presse/evolution_demogenetique_en_foret_modeles_et_simulation)

Il s'agit de conduire cette évaluation en prenant en compte une palette de scénarios de changement global. A cet égard, une approche de dynamique de système des trajectoires, est préférable à une tentative de prédiction d'un futur d'état du fait du contexte d'incertitude sur de nombreux paramètres. Il s'agit aussi de clarifier le domaine d'applicabilité de ces mesures.

**e) Mise au point de mesures innovantes pour les gestionnaires et décideurs visant à réduire la vulnérabilité des écosystèmes et amélioration de la capacité à identifier les processus-clés et les interactions qui pilotent les services écosystémiques**

Cette approche repose sur l'utilisation d'approche de modélisation intégrative et dynamique. Les processus-clés considérés peuvent être la dynamique forestière, le cycle de l'eau, la fixation du carbone, le comportement du feu. Sur ce dernier point par exemple, les modèles résultant du couplage des processus de combustion, des données atmosphériques et aérologiques, des paramètres topographiques, et des variables liées à la biomasse, constituent des outils de simulation extrêmement puissants et générateurs de nombreuses applications (Figure 4).

Il convient également de mentionner la méthodologie émergente de définition nouvelle de la station forestière, fondée sur des paramètres quantifiables (réserve en eau, niveau trophique,



Source : Pimont et Dupuy –INRA Avignon.

**Figure 4 - Le modèle 3 D HIGRAD-FIRETEC couplé feu-atmosphère.**

Développé par l'INRA et le Los Alamos national Laboratory aux USA, il permet des simulations de la propagation du feu dans des milieux complexes (couverts végétaux, relief). Il a une résolution spatiale de 2 m et peut couvrir une zone allant de 5 à 50 ha. À gauche, feu simulé, à droite, photo de feu réel. (Pimont F. 2008 - Modélisation physique de la propagation des feux de forêts : effets des caractéristiques physiques du combustible et de son hétérogénéité. Université de la Méditerranée, Aix Marseille II. Thèse de doctorat - 323 p).

éclairage ...) et permettant de ce fait des simulations sous différents scénarios d'évolution climatique ; couplée aux outils SIG, cette nouvelle méthodologie fournira un outil très puissant d'aménagement, à différentes échelles spatiales et temporelles.

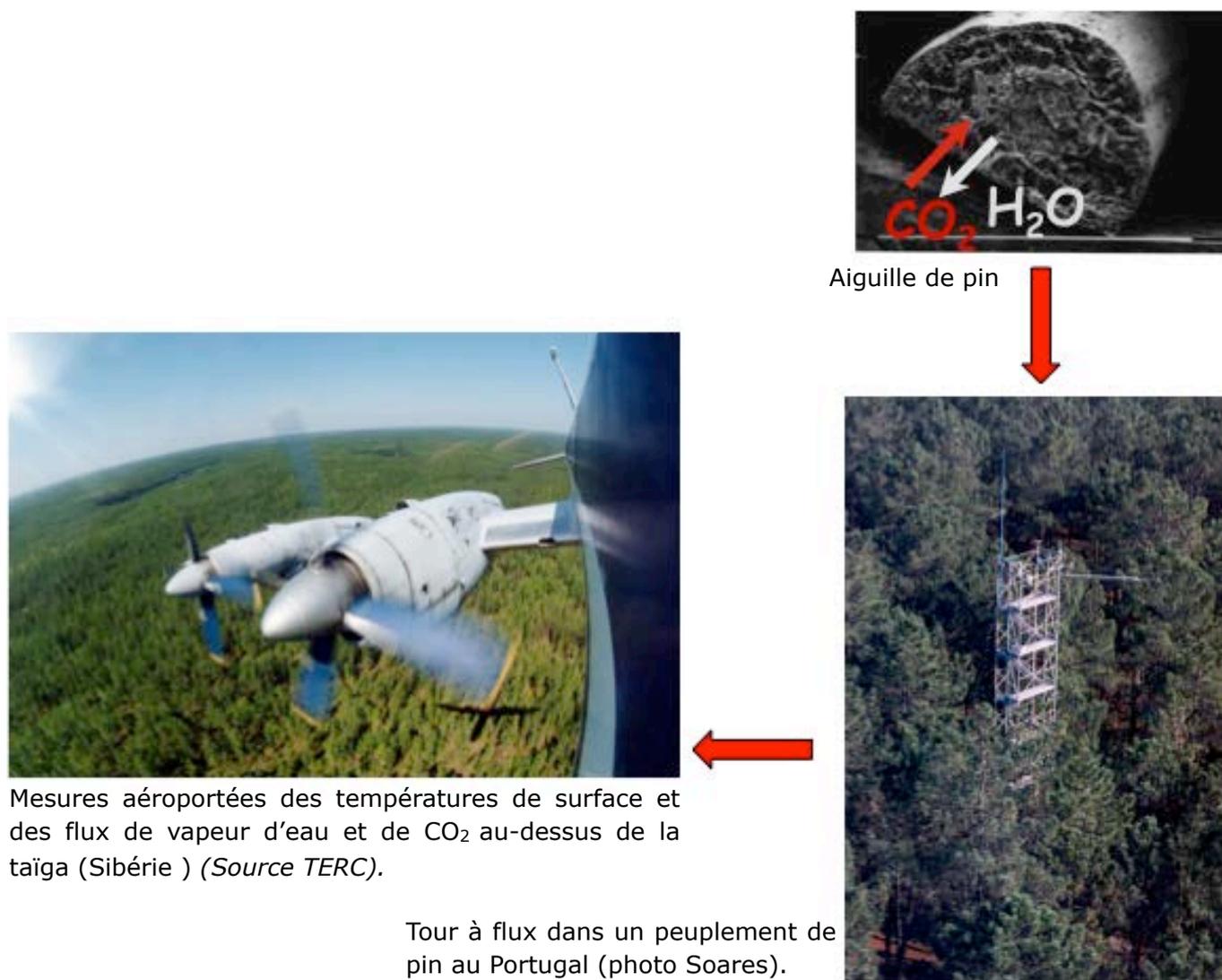
Pour l'ensemble des approches scientifiques évoquées ci-dessus, le développement de nouveaux outils et méthodes de recherche, tels que les expériences rétrospectives et les outils de modélisation et de simulation, doit jouer un rôle majeur pour surmonter les contraintes classiques liées à l'expérimentation forestière et accélérer la production et la dissémination de

connaissances.

f) Dans tous les cas, acquérir les données sur les processus écophysologiques de base, tels que les échanges forêt-atmosphère, permettant les changements d'échelle, allant de l'organe jusqu'à celle du paysage.

Il s'agit d'un enjeu considérable qui nécessite un réseau cohérent de sites instrumentés et de systèmes d'observation (Figure 5).

### 2.3. Technologies de mesures et d'observations des écosystèmes, au sol ou embarquées (aéronefs, satellites) : une géomatique<sup>3</sup> innovante



Mesures aéroportées des températures de surface et des flux de vapeur d'eau et de  $\text{CO}_2$  au-dessus de la taïga (Sibérie) (Source TERC).

Tour à flux dans un peuplement de pin au Portugal (photo Soares).

**Figure 5 - Échanges forêt-atmosphère – intégration de l'échelle de l'aiguille de pin, à celle du peuplement, et jusqu'au continent.**

On peut espérer qu'une réduction des coûts permettra de développer l'usage des photos et images en foresterie grâce à la numérisation et au couplage avec le SIG, on pourrait en dériver des outils de gestion (suivi et anticipation de phénomènes de dépérissement en temps réel par exemple) et de planification (aménagement).

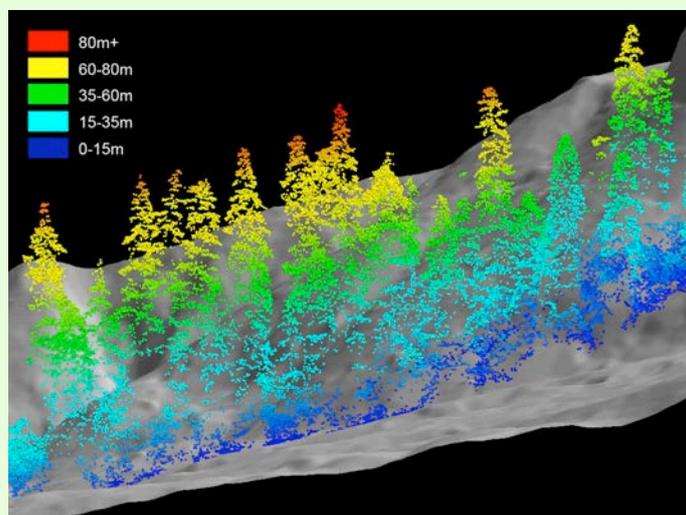
<sup>3</sup>La géomatique regroupe l'ensemble des outils et méthodes permettant de représenter, d'analyser et d'intégrer des données.

Apparue il y a quelques années, la technologie LIDAR (Light Detection And Ranging) s'avère extrêmement prometteuse dans le domaine forestier, avec de nombreuses applications en cours et à venir (encadré 3).

### Encadré 3. Une technologie prometteuse : le LIDAR

Les applications à base de la technologie LIDAR (Light Detection And Ranging) sont en pleine expansion dans de nombreux domaines (topographie, réalité augmentée, rétro-ingénierie, météorologie, accidentologie, archéologie, etc...). Les principes de fonctionnement de ces appareils consistent à analyser le décalage temporel ou de phase entre le signal émis par le faisceau laser et celui réfléchi par un obstacle rencontré. Les traitements de signaux utilisés permettent de calculer la distance séparant l'émetteur de l'obstacle. Connaissant la direction visée par l'appareil, on obtient alors la position dans l'espace tridimensionnel de l'obstacle rencontré. En répétant cette opération dans de multiples directions on obtient un nuage de points 3D décrivant l'espace exploré par l'appareil. Dans le domaine forestier, des applications dédiées sont en plein développement. Les applications les plus abouties s'appuient sur des **scanners aéroportés** pour obtenir des données d'inventaire directement (par exemple la hauteur des peuplements, voir Figure a ci-contre) ou après traitement et modélisation (biomasses).

Une autre méthode consiste à utiliser un **scanner laser depuis le sol** avec une portée de quelques dizaines de mètres et une résolution pouvant atteindre 3 mm à 25 mètres (Figure b).



**Figure a.** Cette image générée par un LIDAR aéroporté montre le profil en hauteur du couvert forestier le long d'un transect dans un peuplement de douglas de 500 ans dans une forêt primaire de l'Orégon aux Etats-Unis. Chaque point représente le point d'impact et de réflexion d'une onde laser. Les couleurs correspondent à la hauteur au dessus du sol. Source et photo : Oregon State University – College of Forestry <http://oregonstate.edu/terra/2010/10/light-on-leaves/>



**Figure b :** Visualisation à plat du nuage de points 3D sur 360° représentant une placette suivie en Forêt domaniale de Bride 57 (Saisie : Adelin Barbacci, 2008).

Source INRA Nancy – [www2.nancy.inra.fr](http://www2.nancy.inra.fr)

L'intérêt de l'approche est d'acquérir une information géométrique complexe dans un laps de temps assez court, compatible avec des études sur des dizaines voire des centaines de placettes, à condition de disposer des outils de stockage et de traitement des données adéquats. L'échelle spatiale

de la placette et l'observation depuis le sol est d'un grand intérêt pour l'observation de dispositifs permanents ou temporaires dans le contexte opérationnel des inventaires forestiers et de l'évaluation de la biomasse. La méthode est également d'intérêt dans le contexte scientifique des travaux sur les processus écologiques de compétition et de régénération des écosystèmes forestiers, autant pour réaliser des observations que des maquettes virtuelles de peuplement (en vue de modèles « structure-fonction » à l'échelle d'une communauté d'arbres).

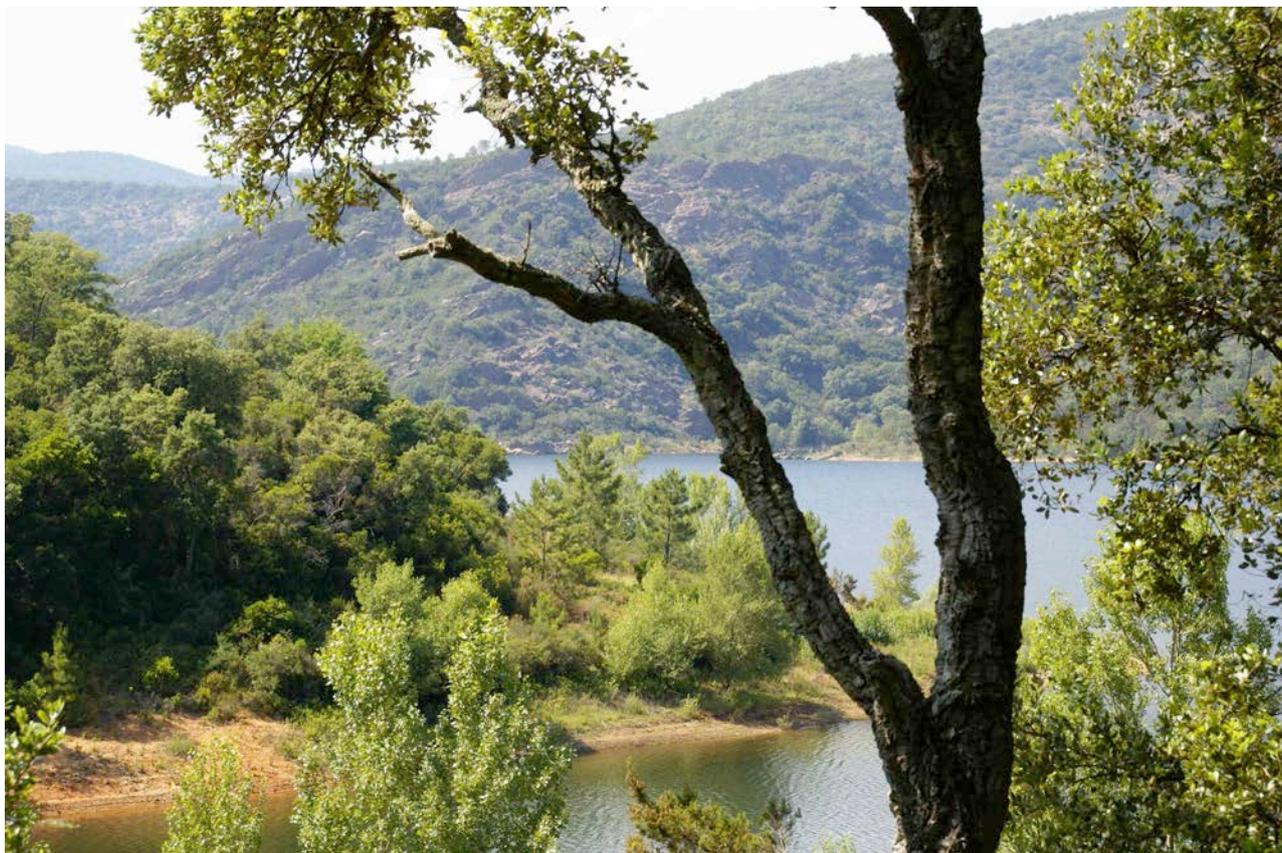
a) Les lidars embarqués (satellite, ou aéronefs) vont faciliter, compléter et enrichir les méthodes d'inventaires fondés sur la reconnaissance au sol, la photogrammétrie et la télédétection. Avec le LIDAR, il sera possible de cartographier les paramètres importants pour l'inventaire forestier en combinant par des méthodes automatiques données au sol et données LIDAR, produisant ainsi des données au niveau du peuplement d'une grande précision à un coût fortement réduit.

Le LIDAR permet également une bonne appréhension du relief et de la hauteur des arbres. La technique du balayage par laser aéroporté est aussi très utile dans l'évaluation de nombreux autres services écosystémiques forestiers, tels que la comptabilité du carbone basé sur l'estimation de la biomasse forestière et la détection et évaluation des habitats d'espèces-clés impliquées dans le maintien de la biodiversité.

b) les lidars terrestre sont capables de décrire avec précision une placette forestière dans ses caractéristiques dendrométriques, mais aussi l'enchevêtrement des branches et feuilles du houppier. Moyennant le développement de puissants traitements de données automatisés, les lidars peuvent fournir des données sur les contraintes mécaniques (qualité du bois) liées à la forme des arbres, la reconnaissance automatique des essences, la dynamique du couvert, la compétition au sein du peuplement, etc.

## 2.4. Paiement pour les services environnementaux

Les voies de recherche suivantes dans le domaine économique devraient permettre de progresser vers une meilleure rémunération des services environnementaux (Figure 6) :



**Figure 6 - Le lac de barrage de La Môle** situé dans un bassin versant totalement forestier (chêne-liège) fournissant en eau la ville de Saint-Tropez (Var). L'agence de l'eau verse une redevance annuelle aux propriétaires forestiers publics et privés, pour contribuer à l'entretien des coupures de combustibles (pare-feux), limitant ainsi le risque d'incendie, et donc celui de sédimentation du barrage et de la détérioration de la qualité de l'eau. Photo : C.Birot.

1. Application et/ou élargissement des méthodes d'estimation de la valeur économique et de transfert des bénéfiques pour obtenir des mesures cohérentes et intégrées de valeurs forestières marchandes et non marchandes.

2. Mise au point de systèmes de comptabilité environnementale pour les ressources forestières aux niveaux régional et national dans le but d'améliorer l'évaluation des changements subis par les ressources forestières en relation avec la valeur des stocks, biens et services qu'elles procurent.

3. Estimation, à l'aide de cadres économiques communs, de la rentabilité des ressources forestières et mise au point de recommandations pour leur amélioration, en analysant de nouveaux marchés, produits ou utilisations (biomasse pour la bioénergie), et meilleure mobilisation des ressources existantes (réf. 3).

4. Conception, mise en œuvre et évaluation des instruments de politique (dont des instruments basés sur le marché) pour promouvoir la fourniture optimale de biens et services marchands et non marchands (par exemple l'utilisateur paie des systèmes pour l'utilisation de services environnementaux fournis par les gestionnaires forestiers ou les autorités publiques).

5. Elaboration de nouveaux instruments et filières de commercialisation pour la fourniture de biens et services tirés de la forêt, y compris ceux basés sur l'intégration horizontale et verticale des agents économiques dans la filière et prenant en compte les communautés dépendantes des forêts et des secteurs apparentés.

## **2.5. Appuyer la gouvernance, la décision de gestion et son suivi : rôle des sciences économiques et sociales**

Les décisions à prendre en matière forestière se préparent sur la base d'abord des sciences de la nature. Ces dernières sont cependant impuissantes, à elles seules, à orienter des décisions qui nécessitent d'arbitrer entre objectifs susceptibles d'être poursuivis, de mesurer les dépenses d'aujourd'hui en référence aux résultats attendus demain, de peser de même les risques encourus selon les enjeux en cause, de se prémunir encore contre les incertitudes qui ne peuvent être réduites par ailleurs. Les sciences économiques, sociales et politiques, traditionnellement faibles en France en matière forestière, sont appelées à jouer un rôle essentiel et croissant avec la complexité des enjeux, les changements écologiques et sociétaux, les incertitudes nombreuses devant lesquelles nous nous trouvons placés. Si une aide à la décision est attendue de la science pour répondre à ces besoins, la décision reste quant à elle du ressort des décideurs. Cependant, les mêmes sciences peuvent s'avérer utiles pour faciliter la mise en application de cette décision et en évaluer les résultats.

### **Arbitrer entre objectifs**

La forêt engendre de nombreux services écosystémiques entre lesquels existent des interactions sous forme de synergies ou de compétition. On place souvent sur le devant de la scène la question de la compatibilité entre production de bois et fourniture d'autres services. Cependant, des interactions existent aussi entre types de bois (par ses produits, sous-produits et ses utilisations en fin de vie, le bois d'œuvre alimente toutes les filières industrielles ; une concurrence forte apparaît entre utilisateurs de rondins ou plaquettes). De même, deux

services écologiques peuvent être complémentaires ou entrer en conflit (par exemple, selon les cas, la séquestration de carbone et la préservation de la biodiversité). Des méthodes d'analyse de productions jointes, d'analyse intégrée ou d'analyse multicritère s'avèrent alors nécessaires. Des développements dans ce sens sont encore attendus dans le domaine forestier pour lequel se présente une multitude de problèmes de ce type.

### **Analyser les coûts en fonction des avantages**

L'une des méthodes économiques les plus répandues est l'analyse coûts-avantages qui a d'ailleurs eu un rôle précurseur en foresterie où a émergé la théorie de l'investissement. De nombreux développements restent encore à accomplir dans ce domaine, notamment en liaison avec l'intégration de nouveaux services : outre l'indicateur de rentabilité qui permet de traiter l'économie du bois en forêt, des outils similaires seraient particulièrement utiles en matière de carbone, d'une part, de biodiversité, d'autre part.

### **Prévenir et gérer les risques**

La montée du risque en forêt s'explique en partie par des aléas plus prégnants (sécheresse, éventuellement tempête) mais aussi par une vulnérabilité plus grande des forêts (augmentation de la productivité, de la hauteur et du volume sur pied des forêts). La prise en compte effective et formelle des risques y est relativement nouvelle et mérite d'être encore approfondie. La prévention des risques doit conduire à une réduction de la vulnérabilité des forêts tandis que des méthodes adaptées de partage des risques et d'assurance restent encore à perfectionner.

### **Evaluer dans l'incertain**

Les méthodes de décision dans l'incertain demandent des recherches spécifiques portant sur la diversité des solutions à organiser et sur les moyens pour le faire, ainsi que sur la manière de fixer des priorités ou d'arbitrer entre options concurrentes selon leur plus ou moins grande réversibilité. Elles comprennent également le développement d'approches de type gestion adaptative dans le double objectif de promouvoir une plus grande souplesse des solutions mises en œuvre et d'appliquer rapidement des nouvelles connaissances grâce à une étroite association entre chercheurs et gestionnaires.

### **Formuler politiques et stratégies**

Même si les forêts françaises font partie du patrimoine privé de l'Etat, de collectivités, de particuliers ou d'entreprises, elles ont partiellement un caractère de bien commun ou public. Celui-ci justifie la mise en place de politiques publiques dont l'objet premier est de réconcilier intérêts publics et privés, considérations collectives et individuelles, à travers une bonne information, une concertation, des approches contractuelles, incitations et réglementations. Les besoins sont croissants dans ce domaine peu couvert par la recherche scientifique au niveau forestier.

## Mettre en place une gouvernance appropriée

La multiplicité et l'intensité croissante des attentes relatives à la forêt justifient la mise en place d'une gouvernance appropriée<sup>4</sup> permettant de partager les objectifs et les moyens de l'action publique de manière à rendre celle-ci plus efficace. La participation est une composante du développement durable au même titre que la maîtrise des risques et le caractère soutenu de la fourniture des divers services écosystémiques de la forêt. Les sciences sociales et politiques ont vocation à analyser cette gouvernance et à proposer des améliorations.

### 2.6. Technologies des produits à base de bois

On peut distinguer plusieurs catégories de produits :

- le bois massif utilisé principalement en charpente et construction, dans une moindre mesure en menuiserie (menuiseries industrielles) et plus rarement dans l'ameublement, sans oublier quelques applications spécifiques en agro-alimentaire (tonnellerie) où les extractibles (ces molécules situées dans le duramen (bois de cœur) qui lui donnent sa couleur, son odeur, et participent à sa durabilité naturelle et à ses caractéristiques physiques et acoustiques) jouent un rôle important.

- le bois massif reconstitué et les divers types de panneaux, du contreplaqué et LVL (*laminated veneer lumber ou lamibois*) au MDF (*medium density fiber*)<sup>5</sup> et panneaux de fibres. Les utilisations concernent tous les domaines, de la construction à l'ameublement et ont tendance à remplacer les matières plastiques, notamment avec le MDF, dans de nombreuses applications. Ce sont des produits technologiques élaborés, qui conservent la structure «microscopique» du bois.

- le bois énergie, disponible sous forme de rondins, bûches, plaquettes et granulés, utilisé en combustion, où l'intérêt est uniquement la composition en carbone et hydrogène du matériau.

- le bois source de bio-carburant, polymères, pré-polymères, molécules à haute valeur ajoutée, valorisant sa composition chimique.

De façon très schématique et probablement trop simpliste, on peut dire que les résineux ont des utilisations en Pâtes et Papiers, Bois massif et reconstitué pour la construction principalement et que maintenant le problème se pose quant aux débouchés des feuillus, en particulier pour les gros diamètres.

Il est sûr que pour le bois énergie, carburant et chimie, les feuillus devraient être la matière première majeure (cf. le programme allemand de bio-raffinerie ligno-cellulosique, focalisé sur les feuillus tels que Hêtre, Bouleau et Peuplier).

Au sein de ce domaine très vaste, on a ciblé ci-dessous quelques thématiques :

---

<sup>4</sup> Par exemple, commissions régionales de la forêt et des produits forestiers

<sup>5</sup> Il s'agit de types de panneaux

## **a) Technologies avancées pour la transformation du bois**

- Méthodes non destructives pour la caractérisation du matériau en fonction de ses utilisations potentielles (classement pour des applications spéciales, classement des grumes, poutres et planches, scanning et technologies 3D, spectroscopies....).

- Développement « d'archétypes » des essences de bois permettant de prédire de façon fiable les propriétés utiles des pièces référencées (ayant conservé les informations d'espèce et de provenance, y compris au sein de l'arbre) à partir de jeux d'indicateurs mesurés « au défilé » par des méthodes non destructives

- Développement des procédés d'obtention de bois massifs ou reconstitués, modifiés par traitements, chimique, physique (thermique, plasma, mécanique, rayonnement...) pour améliorer la durabilité et conférer au bois massif et reconstitué des propriétés particulières pour de nouvelles utilisations (panneaux respirants, décoratifs, capteurs à traitement d'atmosphères...etc....).

*Remarque : Ne pas oublier qu'un produit durable (c'est à dire rendu résistant à la dégradation) n'est pas forcément un produit économiquement recyclable.*

- Méthodes de préservation et de traitement de surface respectueuses de l'environnement, notamment en valorisant le potentiel de durabilité naturelle des bois et en développant des outils de sélection des pièces de bois en fonction de leur usage et de leurs propriétés prédites.

- Obtention de produits Bois « verts » avec le minimum de traitements. Adapter les technologies anciennes de transformation du Bois avec les concepts actuels. Adapter les essences aux produits et utilisations souhaités (bois durables naturellement).

- Mise au point et adaptation d'assemblages mono ou multi-matériaux, mono ou multi-fibres, mécaniques, collés, soudés...en fonction des conditions de réalisations, d'utilisations, de durée de vie souhaitée et de recyclage. Développement de nouveaux types de composites basés, exclusivement ou partiellement sur les sous produits de l'agriculture, des IAA, des industries du Bois.

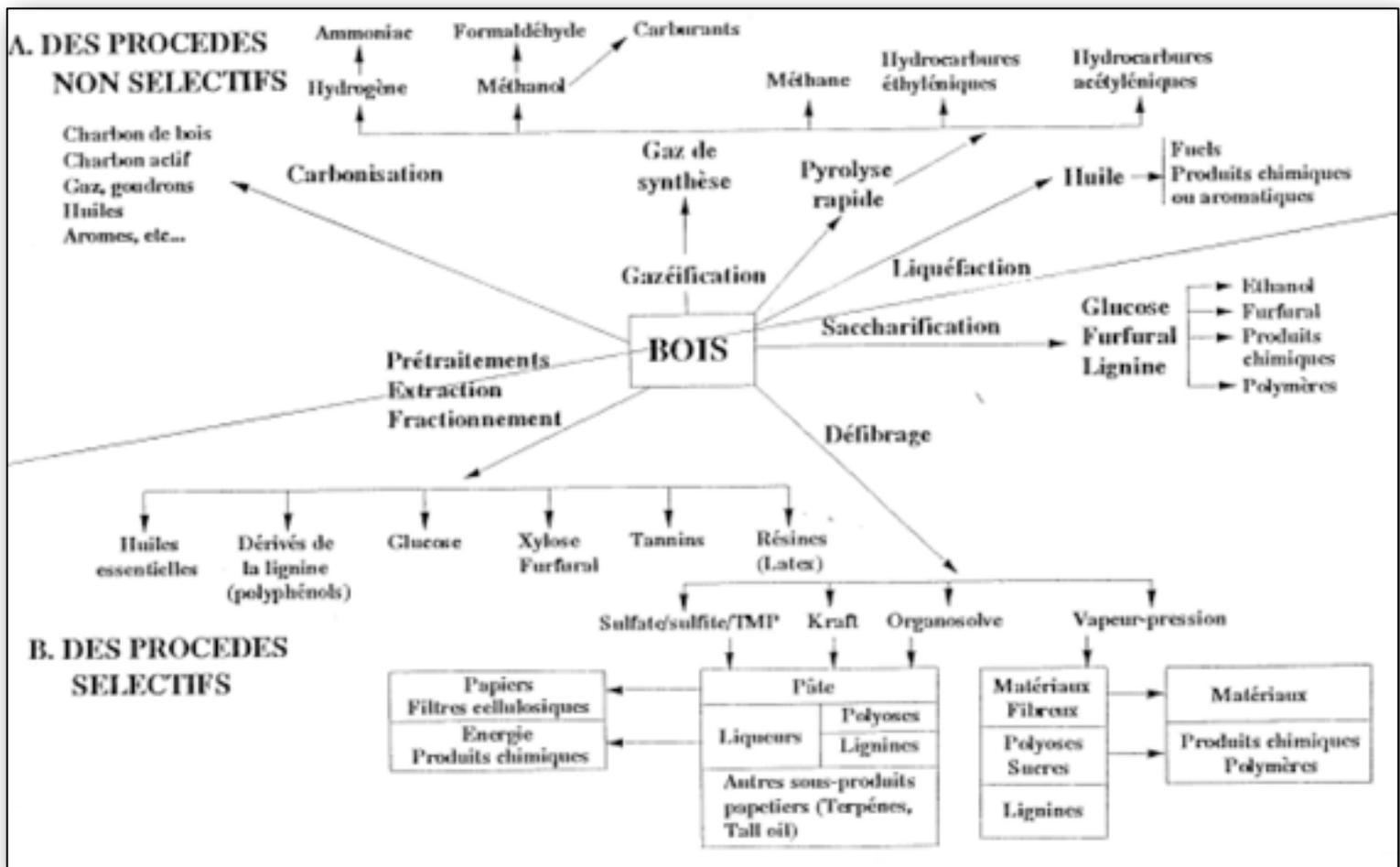
## **b) Bio-énergie - bio-carburants et bio-raffinage**

C'est certainement le domaine où il faudra porter le plus d'efforts en recherche/développement. Les réactions de base sont bien connues, par contre le passage à l'étape pilote commence seulement à se faire.

- Réaliser des études prospectives sur la disponibilité en Biomasse forestière (et en sous-produits agricoles) en vue de prévoir les différents scénarii de valorisations possibles.

- Développer des méthodologies (en utilisant l'Analyse de Cycle de Vie) pour dégager les procédés de valorisation énergétique (combustion, gazéification, pyrolyse...) les plus efficaces et les moins polluants (problèmes liés à la combustion dans les installations de faible et moyenne capacité) en fonction de la ressource, de sa nature, de sa disponibilité et des usages prévus.

*Pour ce qui concerne la valorisation chimique, elle ne peut se concevoir de façon économiquement viable que dans le cadre des bioraffineries. On sait dès à présent que l'on*



**Figure 7 - Chimie du bois**

peut reconstituer toute la chimie organique à partir du bois, (cf Figure 7) qui rassemble toutes les réactions possibles et classe les procédés en deux catégories :

- les procédés non sélectifs produisant les matières premières chimiques de base, souvent à partir du gaz de synthèse CO et H<sub>2</sub>, ou des dérivés aromatiques issus de la lignine. Ces procédés non sélectifs, seront à l'origine des valorisations énergétiques du bois et des bio-carburants liquides envisagés, en particulier à partir des synthèses Fischer-Tropsch.

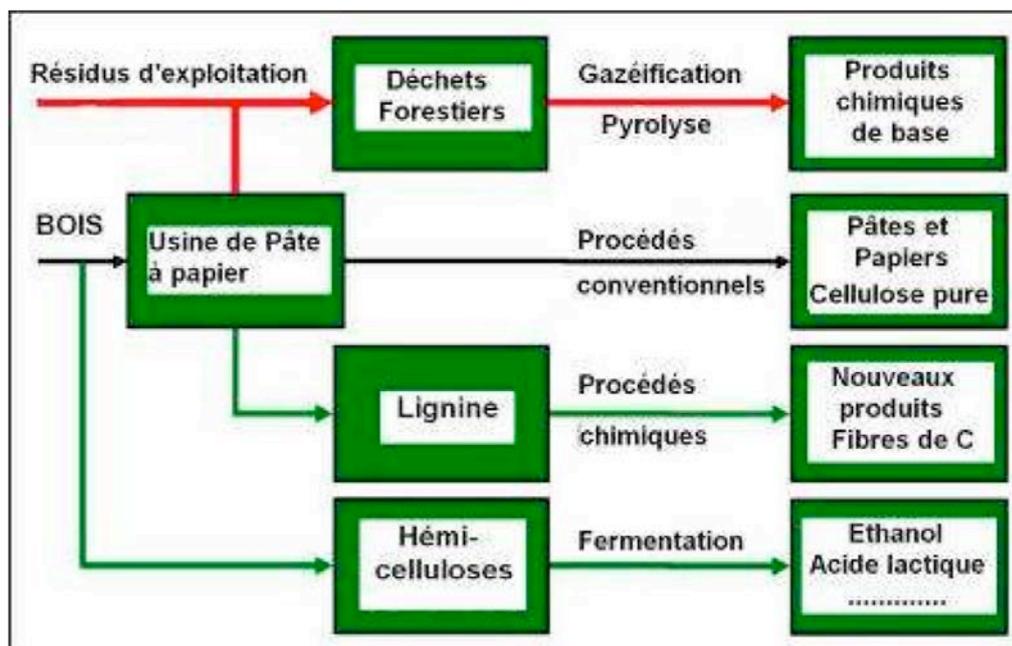
- les procédés sélectifs produisant actuellement des produits chimiques directement utilisables : des additifs et aromes alimentaires, gélifiants, épaississants, émulsifiants, adhésifs, résines, conservateurs, tannins etc....

- Le concept de *Bio-raffinerie*, ou plutôt *Bio-raffinage* correspond à : un ensemble intégré de procédés conduisant à plusieurs produits à valeur ajoutée, en un seul endroit : i) Carburants, combustibles ; ii) Produits chimiques de spécialités ; iii) Produits chimiques de base ; iv) Polymères et précurseurs, avec des matières premières biologiques renouvelables (végétales ou animales), comme les sous-produits forestiers, agricoles, d'industries du bois et agroalimentaires.

On peut distinguer deux types de bioraffineries ligno-cellulosiques possibles :

1) *celles basées sur les unités de production de pâtes existantes* (Figure 8):

Peu de modifications sont nécessaires pour transformer une usine de pâte chimique en Bio-raffinerie. Il faut prévoir l'extraction des hémicelluloses et de la lignine, rajouter un atelier de

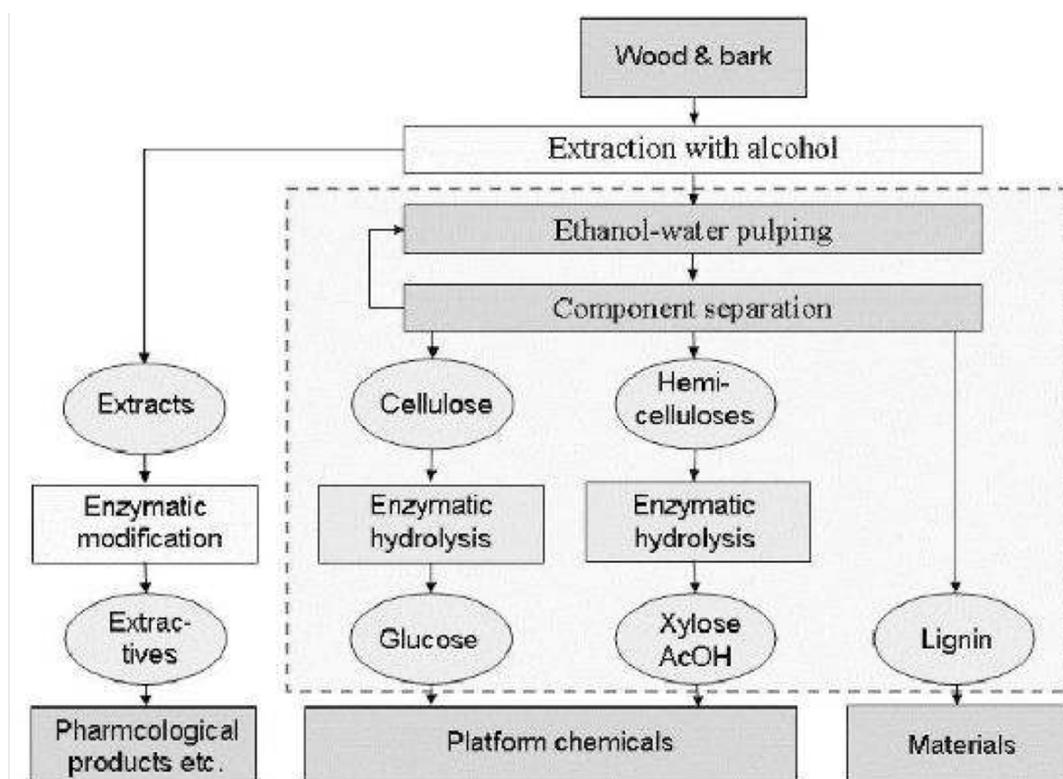


**Figure 8 - Schéma de bio-raffinerie basée sur des usines de pâte à papier**

gazéification sur les résidus ou les liqueurs noires. A partir des hémicelluloses il est possible d'obtenir, de l'éthanol, du butanol, des polymères et leur précurseurs, acide lactique, PHA (PolyHydroxyAlcanoates), 1-3 Propanediol, du xylitol, glycerol et furane. Pour ce qui concerne la lignine, on peut améliorer son extraction à partir des liqueurs noires. La lignine est déjà utilisée en tant que lignine kraft et comme lignosulfonate, mais peut permettre, après traitement chimique, d'obtenir des phénols des résines phénoliques, du polyuréthane et des polyols. Actuellement la tendance est l'obtention de fibres de carbone ou charbon actif.

## 2) des unités correspondant à de nouveaux concepts, basés sur des procédés organosolvés

C'est dans ce domaine qu'il faudra investir, sur des procédés organosolvés à l'éthanol qui sont certainement les plus adaptés, que ce soit pour les feuillus ou les plantations énergétiques du type Miscanthus et les déchets agricoles secs. Un schéma possible, repris du programme allemand de valorisation des feuillus (Hêtre, Bouleau, Peuplier), est donné en Figure 9.



**Figure 9 - Schéma de bio-raffinerie basée sur des procédés organosolvés à l'éthanol**

## Conclusions

Dans un contexte marqué par de fortes évolutions et de nombreuses incertitudes, le potentiel de la science et de la technologie, dans leurs formes et leurs champs disciplinaires multiples, pour fonder le développement d'un secteur forestier dans toutes ses dimensions : économiques, sociales et environnementales, est considérable. Au delà des nécessaires avancées disciplinaires, la capacité d'intégration de connaissances variées, et de divers niveaux d'échelle de temps et d'espace, constitue un défi majeur. L'expertise scientifique collective, et la mise en œuvre de structures adéquates de développement, sont des éléments indispensables à la valorisation du progrès des connaissances.

## Pour en savoir plus

- (1) Neale D.B, Kremer A. 2011 Forest tree genomics: growing resources and applications - *Nature Reviews - Genetics* - Volume 12 Feb. 2011 pp. 111-122
- (2) Nathan R, 2008, From the Cover: Movement Ecology Special Feature: An emerging movement ecology paradigm ; *PNAS* 2008 105:19050-19051; doi:10.1073/pnas.0808918105
- (3) Buongiorno J. Raunikar R., Zhu S. 2011. Modélisation des conséquences possibles de la future demande bioénergétique mondiale pour le bois et les forêts en France. *Revue Forestière Française* 63(1):57-68.
- (4) [http://www.inra.fr/les\\_partenariats/collaborations\\_et\\_partenaires/europe/participation\\_aux\\_programmes\\_europeens/quelques\\_exemples\\_de\\_reussites/baccara\\_biodiversite\\_et\\_changement\\_climatique\\_analyser\\_les\\_risques](http://www.inra.fr/les_partenariats/collaborations_et_partenaires/europe/participation_aux_programmes_europeens/quelques_exemples_de_reussites/baccara_biodiversite_et_changement_climatique_analyser_les_risques)